



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
Industrial de Barcelona

TREBALL FINAL DE MÀSTER
MÀSTER EN ENGINYERIA INDUSTRIAL

Millores electromagnètiques a la màquina elèctrica rotativa FM-1

Memòria

Autor: Marcel Martí i Tubert
Director: Ricard Bosch i Tous
Convocatòria: Juny 2018

Resum

Ricard Bosch en la seva tesi doctoral va demostrar que en màquines elèctriques sense ferro al rotor, no es produïen forces de reluctància entre rotor i estator, eliminant la necessitat dels coixinets. Amb aquesta premisa es van dissenyar i construir la VF-1 i la FM-1, ambdues màquines elèctriques bifàsiques d'inducció sense ferro al rotor.

La FM-2 és la següent en la l'evolució d'aquesta tipologia de màquines. Presenta el mateix rotor i estator que la seva antecessora directa, la FM-1, però amb la innovació d'aplicar el concepte de la màquina de Gramme.

Així doncs la FM-2, no treballa amb un, sinó amb dos circuits inductors, els quals s'anomenaran inductor primari i inductor secundari, a més a més del rotor. El circuit inductor primari consta de 36 ranures de fil prim per les quals hi circula baixa intensitat. L'inductor secundari consta de 36 conductors actius formats per dues espirals de coure recuit d'1/4" tancades sobre sí mateixes (a l'estil de Gramme).

Cada ranura del circuit inductor primari tindrà doncs un transformador d'intensitat propi. El fet de tenir un transformador d'intensitat individual per cada ranura permet activar o desactivar aquella ranura en tot instant, per simple commutació dels 36 inductors primaris. L'avantatge és que permetria poder controlar el nombre exacte de pols i vies en paral·lel per pol, en cada moment. Teòricament, permetria controlar la corba parell velocitat en tot instant.

En aquest treball no només s'explica el concepte teòric, sinó que es du a terme la fabricació i muntatge de l'inductor secundari, així com el disseny de l'inductor primari. També es defineixen les passes a seguir de cara a obtenir el conjunt final format per inductors primari i secundari, i rotor.

I. Motivació	7
II. Objecte, objectiu i abast	7
1. Introducció	9
2. Prototips antecessors	10
2.1. Prototip VF-1	10
2.1.1. Principi de funcionament	10
2.1.2. Connexió Scott	10
2.1.3 Paquet magnètic estatòric	11
2.1.4 Circuit hidràulic	12
2.1.5 Rotor	13
2.1.6 Resultats dels assajos	13
2.2. Prototip FM-1	14
2.2.1. Principi de funcionament	14
2.2.2. Disseny i geometria	14
2.2.3. Modificacions en les ranures	15
2.2.4. Resultats i conclusions	16
2.3. Consideracions prèvies per la FM-2	16
3. Propostes de modificació	18
3.1. Diàmetre dels toroïdals	18
3.2. Ranurat estatòric	18
3.3. Circuit hidràulic	19
4. Disseny basat en la màquina de Gramme	20
4.1. Història de la dinamo de Gramme	20
4.2. Particularitats del bobinat de Gramme	21
4.2.1. Experiment previ	21
4.2.2. Avantatges respecte als antecessors	22
5. Construcció del prototip	23
5.1. Rotor o induït	23
5.2. Inductor primari	24
5.3. Inductor secundari	27
5.3.1. Planxa magnètica	27
5.3.2. Espires	29
5.4. Muntatge	34
6. Planificació	36

7. Estudi econòmic	39
8. Impacte a l'entorn	41
9. Conclusions	42
10. Agraïments	43
11. Bibliografia	44
11.1. Referències bibliogràfiques	44
11.2. Altres referències bibliogràfiques	44

I. Motivació

Dins del màster universitari en enginyeria industrial, després d'haver cursat dues assignatures (*vehICLES híbrids* i posteriorment *configuració de vehicles elèctrics*) se'm va obrir la curiositat d'estudiar, tot i ser mecànic, aquells mecanismes elèctrics que semblaven ser el futur dels vehicles, sector governat per la mecànica i els motors tèrmics actualment.

Per motius laborals, requeria obtenir el títol del Màster en Enginyeria Industrial abans de l'agost de 2018, fet pel qual l'abast del projecte no ha pogut obtenir les dimensions que m'haurien agradat.

II. Objecte, objectiu i abast

OBJECTE

L'objecte d'aquest treball es la màquina elèctrica rotativa proposada per Francisco Moreno (FM-1). Es tracta d'una màquina elèctrica rotativa, amb transformador d'adaptació d'impedància a la font sobre la pròpia màquina rotativa. El transformador resulta imprescindible, ja que els conductors de la màquina rotativa són tubulars de coure, amb una espira per ranura d'estator. Això permet fer el refredament directe del coure amb fluid refrigerant circulant per l'interior dels tubs.

OBJECTIU

A partir de la màquina esmentada FM-1, construïda i assajada per Francisco Moreno, es proposa analitzar-ne el defectes per acostar el seu rendiment al de les actuals màquines comercials d'inducció.

L'objectiu per tant és el de proposar les millores que cal introduir per a millorar-ne les prestacions electromagnètiques, a partir dels resultats obtinguts al treball anterior. L'estator serà el mateix que l'utilitzat per la FM-1, amb l'única diferència que el procés de tallat de les ranures s'ha realitzat amb electroerosió per fil, en lloc de fresar-lo com en la FM-1. Per al rotor, es prendrà el mateix que es va utilitzar per la FM-1, el qual és d'alumini.

ABAST

L'abast vindrà definit per les millores introduïdes, els càlculs, els experiments i la construcció de la màquina FM-2. Dins d'aquest abast es tractarà:

- Dos conductors per pol i fase. El màxim camp ha de coincidir amb una dent i no en una ranura com a FM-1.
- Discussió sobre la connexió Scott i número de pols assolibles a l'estator.
- Disminució d'impedància del inductor secundari.
- Augment de la força magnetomotriu.
- Proposta d'una nova geometria segons el disseny de Gramme.

- Experiment previ de magnetització d'una espira.
- Discussió sobre els pols assolibles en III i II.

Quedarà fora de l'abast del projecte, els assajos per comparar la FM-2 amb la FM-1 així com el disseny dels utilatges de manipulació i fixació de la màquina pel seu funcionament correcte.

1. Introducció

El present document pretén millorar el rendiment de la màquina elèctrica rotativa bifàsica FM-1 dissenyada, construïda i assajada com a TFM (URI: <http://hdl.handle.net/2099.1/25025>), per Francisco Moreno [2015], obtenint una nova màquina elèctrica també rotativa i bifàsica anomenada FM-2 amb unes millors prestacions. Compta amb l'antecedent de la VF-1 (dissenyada per Victor Fuses [2010] <http://hdl.handle.net/10803/6315>).

Es proposa doncs una màquina rotativa sense ferro al rotor, el qual queda reduït a una lamina conductora d'alumini anomenada **induït o rotor**. Com que l'alumini costa més de magnetitzar, cal augmentar la densitat de corrent dels conductors estatòrics a base de construir-los tubulars amb refredament directe pel seu interior i aïllament exterior.

Els conductors estatòrics de la màquina rotativa consten d'una sola espira tancada en curtcircuit sobre sí mateixa, per la qual es fa circular un corrent induït per un transformador secundari toroïdal que l'atravessa. A aquesta espira se l'anomenarà **inductor secundari**, doncs és l'inductor de la màquina rotativa que fa girar el rotor (induït) i alhora és el secundari del transformador toroïdal.

El debanat primari dels toroïdals s'anomenarà **inductor primari**, i és el que anirà connectat a la font d'alimentació.

La transformació Scott entre els inductors primari i secundari permet alimentar el conjunt amb un corrent trifàsic, però que la màquina rotativa rebi una alimentació bifàsica com les seves antecessores.

La innovació proposada depèn molt de la impedància de l'inductor secundari, que tindria que ser la mínima possible. Aquesta es veu molt influenciada per la posició i estructura dels toroïdals, de les seccions del coure, les soldadures i altres aspectes geomètrics que afectin a la reluctància inductiva dels conductors.

En aquesta màquina es busca de minimitzar la velocitat de rotació i augmentar el parell, i per fer-ho es treballa amb un nombre elevat de pols. El tractar-se d'un sistema bifàsic, la màquina rotativa podrà treballar amb un menor número de conductors actius, permetent augmentar els pols respecte el seu equivalent trifàsic utilitzant el mateix nombre de ranures.

2. Prototips antecessors

2.1. Prototip VF-1

2.1.1. Principi de funcionament

En una màquina rotativa sense ferro al rotor, no es genera atracció per reluctància entre aquest i l'estator. Aquestes forces de reluctància desapareixen, doncs el conductor rotòric sota camps alterns es comporta com a lleugerament diamagnètic. Els esforços entre rotor i estator, canvien de signe i poden ser d'un o dos ordres de magnitud més baixes respecte les que generen el parell útil, fet que disminueix enormement els esforços als coixinets.

El principal problema que tenen les màquines sense ferro al rotor es dona en la dificultat d'establir els camps magnètics necessaris per al seu funcionament, i neix la necessitat de treballar amb densitats de corrent més elevades. Un augment en la densitat de corrent suposa també un augment en les pèrdues per efecte Joule (equació 1). Per solucionar-ho es proposa treballar amb refredament forçat i geometries noves. El motiu principal d'introduir el concepte de la refrigeració forçada és per que els conductors a temperatura criogènica tenen un comportament semblant al dels superconductors. Un exemple en seria el coure on a la temperatura de -170° la seva resistivitat baixa fins a una octava part.

$$(1) E=I^2 \cdot R \cdot t$$

La màquina elèctrica VF-1 dissenyada per Victor Fuses [2004] consisteix en la integració d'un sistema inductor primari i secundari amb transformació Scott. L'inductor secundari té una Font formada per lamineles de coure semblants a les espirals del estator d'un sistema de conversió electromecànica.

La font d'alimentació externa trifàsica està connectada al circuit transformador i elevador de corrent que realitza la conversió a un sistema bifàsic desfasat 90° . El circuit inductor primari es troba compost per dos transformadors toroïdals de corrent interconnectats segons la connexió Scott. El secundari del transformador toroïdal d'una sola espira, alimenta les espirals en paral·lel del estator de la màquina rotativa.

2.1.2. Connexió Scott

Es tracta d'un sistema de transformadors reversible que permet obtenir, des d'un sistema equilibrat de tensions trifàsiques, un sistema de tensions bifàsiques d'amplitud inferior i desfasades 90° . Es troba formada per dos transformadors d'intensitat monofàsics idèntics.

L'equip de transformadors toroïdals utilitzats a la VF-1 per la connexió Scott era un varivolt elevador autotransformador SALICRU ARC-13 de 6kVA amb tensió d'alimentació de 220V i una sortida variable entre 0 i 250V. La taula 2.1 en mostra les característiques.

Potencia aparent	S	2	kVA
Intensitat nominal	I_{nom}	14	A
Tensió nominal	V_{nom}	144	V
Nombre d'espises	$N_{espises}$	234	Espises
Tensió nominal per espira	V_{espira}	0,629	V
Intensitat de buit o d'excitació	I_0	80	mA
Diàmetre del fil de coure	\varnothing_{Cu}	1,8	mm
Secció del fil de coure	S_{Cu}	2,54	mm ²
Resistència del bobinat	R_{Cu}	0,43	Ω
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	188	mm
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	70	mm
Altura del torus	h_{torus}	70	mm

TAULA 2.1: CARACTERÍSTIQUES TRANSFORMADORS TOROÏDALS

Aquests 2 transformadors toroidals bobinats, servien de primari d'un secundari d'una espira al transformador, construïda a mida, que alimentava les espises del estator de màquina rotativa, connectades en paral·lel elèctric. Els transformadors d'intensitat es troben situats a banda i banda de l'estator, on mitjançant planxes de coure s'uneixen en paral·lel a les diferents espises, utilitzant soldadura de plom-estany.

2.1.3 Paquet magnètic estatòric

El nucli magnètic estatòric utilitzat es construeix a partir d'un rotor de gàbia d'esquirol d'una màquina d'inducció de rotor anular, és a dir extern al rotor. Les característiques són les que es troben a la taula 2.2.

Número total de ranures	N_{ran}	44	Ranures
Altura del paquet magnètic	h_{paquet}	82,00	Mm
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	148,00	Mm
Diàmetre al fons de la ranura	\varnothing_{ran}	163,00	Mm
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	184,00	Mm
Gruix de la planxa	h_{planxa}	0,51	Mm
Número total de planxes	$N_{planxes}$	155	Planxes

TAULA 2.2: CARACTERÍSTIQUES PAQUET MAGNÈTIC

Pel que fa a les ranures, Victor Fuses aprofita les que li proporciona el propi rotor de gàbia d'esquirol, de geometria trapezoïdal com es pot apreciar a la figura 2.1.

Els conductors elèctric estan formats per tubs de coure recuit comercials amb un 99,9% de coure, normalment utilitzats en sistemes d'aire acondicionat. D'aquesta manera, la refrigeració forçada que requereix treballar amb altes densitats de corrent s'obtindrà a partir de fer circular fluid dins dels propis conductors. Els diferents tubs s'uneixen per formar el

circuit mitjançant una soldadura de plom-estany. El principal problema en la quantitat de soldadures que es realitzen a la VF-1 són les pèrdues per efecte Joule, doncs la resistivitat tant del plom com de l'estany és molt superior a la del coure (d'entre 7 i 12 cops la del coure). Apart de les soldadures, el tubs també es dobleguen per tal de formar les espirs.

La connexió elèctrica entre les espirs es troba en paral·lel, amb debanat de simple capa, un conductor per ranura, i 11 pols per cada una de les dues fases. Cada fase es troba alimentada per un toroide ubicats a cadascun dels extrems del estator.

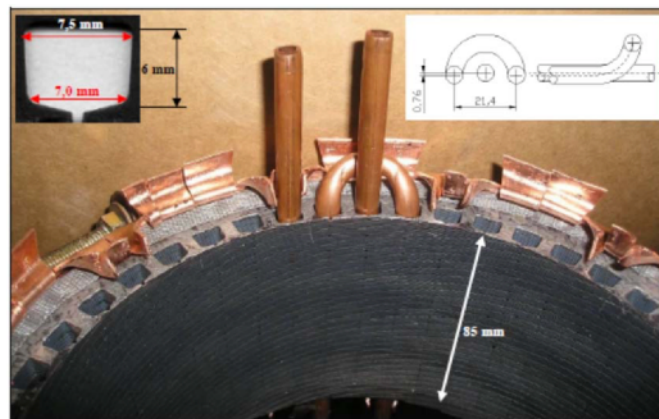


FIG. 2.1: ESTATOR DE LA VF-1

2.1.4 Circuit hidràulic

La VF-1 contava amb un circuit incorporat per a la circulació d'aire, aigua o nitrogen líquid, que com ja s'ha comentat consistia en fer circular el fluid refrigerant per l'interior dels propis conductors de coure. Victor Fuses va observar que la major part de calor (al voltant d'un 60% del total) es produïa al circuit d'alimentació del motor. La resta del calor es generava en les planxes de coure. El sistema dissenyat per la VF-1 estava format per un col·lector comú d'entrada, el qual repartia el fluid per les diferents espirs com es pot veure a la figura 2.2, proporcionant més refrigeració als punts observats amb major generació de calor.



■ Circuit d'entrada ■ Circuits per espirs

FIG. 2.2: CIRCUIT HIDRÀULIC VF-1

2.1.5 Rotor

Com a rotor s'utilitza un cilindre d'alumini d'un diàmetre exterior de 147,5mm deixant 0,25mm d'entreferro. Al centre del rotor s'hi troba el eix de sustentació del disc així com un coixinet. A més a més s'hi afegeix un fre dinamomètric per l'aplicació de diferents parells resistius a l'hora de realitzar els assajos.

2.1.6 Resultats dels assajos

El corrent mesurat al secundari es troba al voltant del 60% del calculat idealment segons la connexió de Scott en un cas equilibrat. Aquest mateix corrent es distribueix de manera desigual entre les 11 branques paral·leles d'alimentació a les espirals de cada fase. De fet el corrent de la branca més allunyada del toroide és un 16% inferior al que circula per la Branca més propera.

Per un corrent nominal de 14A al primari, s'indueixen 2000A al secundari, distribuïts en 185A per cada espira amb una variabilitat al voltant del 8,6% segons la seva proximitat al toroide.

El parell d'arrencada amb un corrent nominal d'entrada es troba al voltant de 0,25Nm, el doble de l'obtingut en les simulacions. La taula 2.3 mostra les diferents mesures del parell resistent obtingut en els assajos.

El lliscament es troba al voltant del 50%.

Corrent del primari [A]	Força mesurada [grams-força]	Força resistent [N]	Longitud del braç [mm]	Parell resistent [Nm]
3,5	11,4	0,11	180	0,020
7,0	43	0,42	180	0,076
10	250	2,45	73	0,179
10,3	94,3	0,93	180	0,167
14	350	3,43	73	0,250
14,1	181,5	1,78	180	0,321

TAULA 2.3: RESULTATS DELS ASSAJOS DE PARELL RESISTENT

Les asimetries i sobretot les soldadures, generen fortes diferències entre els corrents reals als inductors secundaris estatòrics, que són els que fan girar el rotor.

Les diferències experimentals respecte a les simulacions prèvies semblen indicar que la VF-1 pot ser un tipus de màquina poc explorada, ja que el suport teòric pot no ser suficient i caldria incloure nous elements de disseny. El corrent no acaba circulant pels llocs previstos, generant concentracions de densitat de corrent i augmentant les pèrdues.

2.2. Prototip FM-1

2.2.1. Principi de funcionament

El principi de funcionament de la FM-1 és el mateix que el de la VF-1. Es tracta d'una màquina elèctrica rotativa per motor d'inducció sense ferro al rotor. A diferència de la seva predecessora però, s'eliminen les planxes de coure del inductor secundari, les quals es substitueixen per tub de coure de menor diàmetre que els de les ranures estatòriques. Cada espira estatòrica es troba soldada a uns tubs que porten cap al toroïdal. Això augmenta la secció útil de l'inductor secundari i evita els punts de concentració de corrents.

2.2.2. Disseny i geometria

L'últim problema a superar es trobava en la geometria de les ranures. Francisco moreno va decidir treballar amb un sistema d'alimentació corrent bifàsic de manera que el mecanitzat dels caps de bobina estatòrics fossin més senzills. El fet que el rotor no sigui ferromagnètic exigeix que les ranures no siguin tant profundes per no obtenir un gran flux de dispersió en els debanats.

La conversió des de l'alimentació trifàsica de la xarxa es realitza també amb la connexió T-Scott. En el secundari hi ha un total de 18 conjunts polars d'espires de tub de coure de 3/8 que recorren per l'interior de cada toroide, realitzant la funció del circuit inductor. Aquests s'uneixen a tubs també de coure de 1/4 que formen l'alimentació estatòrica del rotor (veure figura 2.3).

El inductor secundari és més llarg, però la secció de coure útil és més favorable, fent que les soldadures resultin menys crítiques.

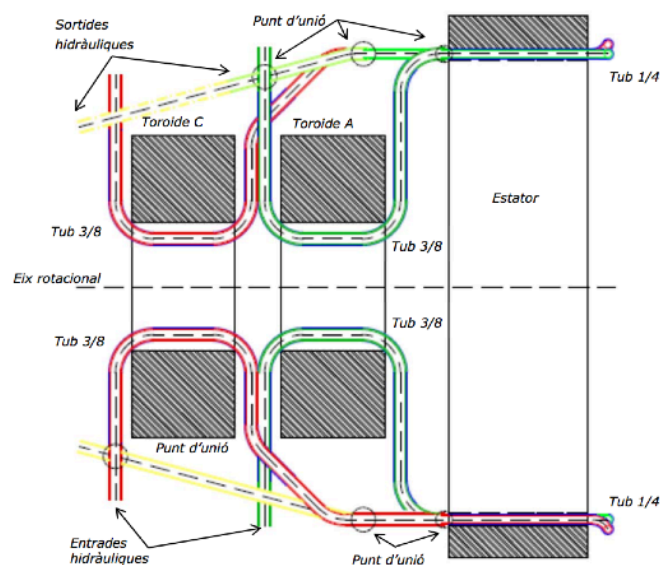


FIG. 2.3: CIRCUIT SECUNDARI FM-1

2.2.3. Modificacions en les ranures

Un dels grans canvis de la FM-1 respecte la VF-1 era doncs el canvi de geometria en el ranurat, que deixava de ser el trapezoidal de la gàbia d'esquirol per prendre la forma desitjada. La comparativa es realitza entre tres possibles geometries de ranura: convencional, oberta i semioberta. La ranura convencional (procedents d'estators d'aerogeneradors d'imans permanents) és la que portava el paquet magnètic subministrat pel taller Puig Pol, en tant que les ranures obertes i semiobertes es podien obtenir a través d'un mecanitzat que retallés les ranures convencionals. La diferència entre les obertes o semiobertes es trobava en la diferència entre les distàncies b_{ss2} i b_{s0} de la figura 2.4.

En diverses simulacions Francisco Moreno va observar que, tot i que en les ranures convencionals hi havia una menor dispersió del flux magnètic, en les ranures obertes i semiobertes hi havia una major penetració de les línies de flux sobre el rotor. Això es traduïa en uns parells molt superiors que no pas en la utilització de les ranures convencionals. Finalment es va decidir utilitzar ranures obertes en lloc de semiobertes ja que les primeres obtenien valors de parell lleugerament superiors als obtinguts amb les segones. Les dimensions finals proposades per la FM-1 són les que es troben en la taula 2.4.

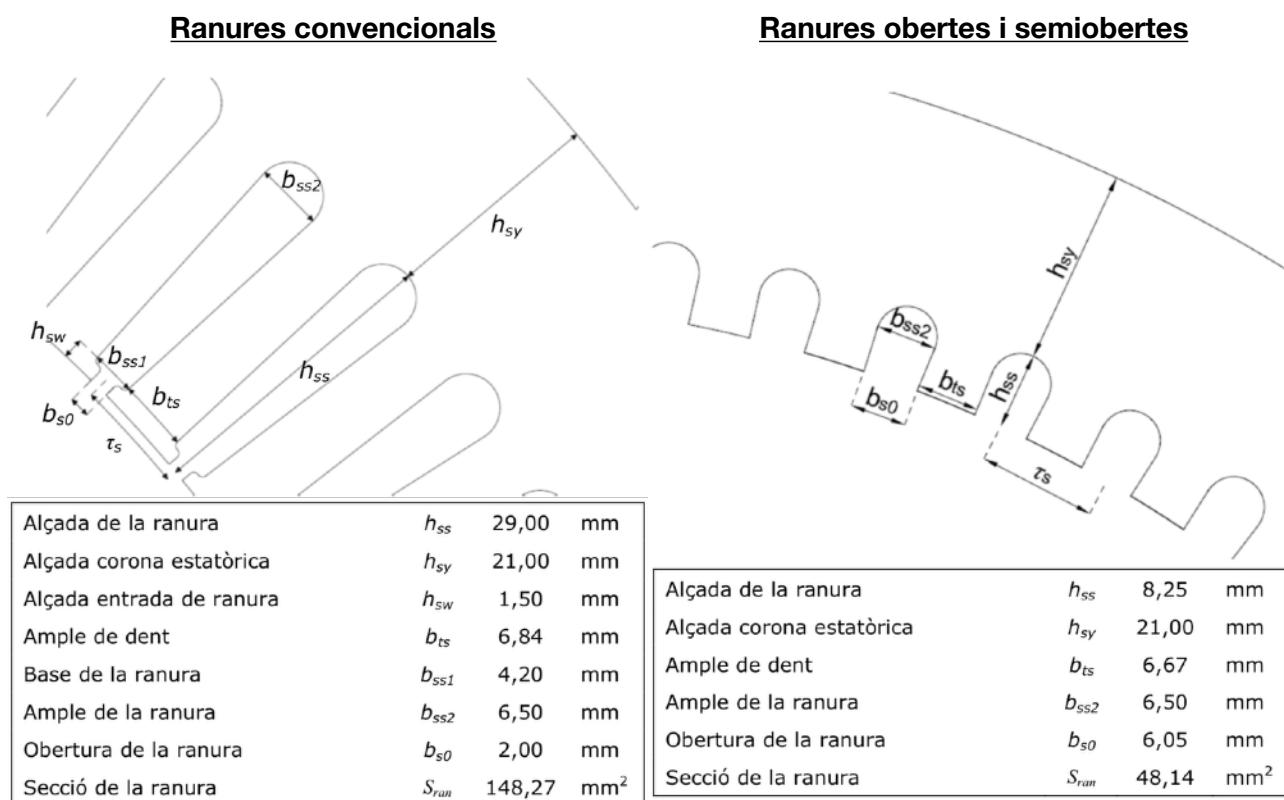


FIG. 2.4: DISSENY DE LES RANURES ESTUDIADES PER LA FM-1

Número total de ranures	N_{ran}	72	Ranures
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	291,50	mm
Diàmetre al fons de la ranura	\varnothing_{ran}	308,00	mm
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	350,00	mm
Gruix de la planxa	h_{planxa}	0,35	mm

Alçada de la ranura	h_{ss}	8,25	mm
Alçada corona estatòrica	h_{sy}	21,00	mm
Ample de dent	b_{ts}	6,67	mm
Ample de la ranura	b_{ss2}	6,50	mm
Obertura de la ranura	b_{s0}	6,05	mm
Secció de la ranura	S_{ran}	48,14	mm ²

TAULA 2.4: PROPOSTA DEFINITIVA DEL RANURAT FM-1

2.2.4. Resultats i conclusions

Després de realitzar diverses simulacions i obtenir-ne el prototip sense sistema de refrigeració, Francisco Moreno arriba a obtenir una màquina amb un lliscament del 39%, que tot i millorar respecte els seus antecessors segueix sent un valor força baix. També destaca que una bona part d'aquesta millora es basa en la substitució de les planxes de coure que tenia la VF-1. S'observa alhora un augment del parell útil, no només amb el canvi de geometria de les ranures sinó també en augmentar l'espessor del rotor.

2.3. Consideracions prèvies per la FM-2

El nou disseny que es pretén donar a la FM-2 partirà dels resultats ja obtinguts en els anteriors models VF-1 i FM-1.

En primer lloc, als estudis realitzats per Josep López López i Victor Fuses i Navarra, en les seves tesis doctorals, es va demostrar que, la utilització d'una font d'alimentació bifàsica ofereix una major facilitat a l'hora de mecanitzar els caps de bobina estatòrics, contra d'una alimentació trifàsica. Disminuint la seva longitud i facilitant enormement el recorregut del coure. El disseny de la FM-1 ja partia d'aquest principi, i per tant la FM-2 també alimentarà el primari amb una font bifàsica. Es proposa d'iniciar els estudis amb la connexió T-Scott de la FM-1 per convertir la tensió trifàsica de la xarxa en bifàsica per l'alimentació.

En segon lloc, Victor Fuses va treballar en la VF-1 amb lamine de coure, les quals van requerir de grans quantitats d'unions soldades. A causa d'aquestes soldadures, el repartiment de tensions era difícil d'observar i sobretot de controlar. En la FM-1, Francisco Moreno va proposar de millorar aquest aspecte a partir de treballar amb tubs, els quals ofereixen una major secció i una major facilitat a l'hora d'analitzar les tensions. Per la geometria d'aquests tubs s'utilitzarà la proposta del disseny final de la FM-1.

Utilitzant debanats de simple capa, la formació dels pols magnètics de cada una de les fases té el màxim a una ranura de la fase contigua, en comptes d'en una dent, dificultant l'establiment en les línies de camp, com ja va advertir Francisco Moreno en el seu estudi.

Pel que fa tant a l'estator com al rotor, s'utilitzaran uns d'iguals als que treballava la FM-1, de manera que els resultats experimentals siguin comparables. La primera operació a realitzar serà la de mecanitzar les ranures d'acord al disseny establert, a partir dels nuclis d'aerogeneradors subministrats pel taller Puig Pol.

Tanmateix, el principal problema amb el que es trobava la FM-1 era en la col·locació dels toroïdals. Com més allunyats del nucli es trobin, més pèrdues resistives s'hauran de considerar. A més cal tenir en compte, que en no disposar d'una distribució simètrica, la resistència per cada fase en la FM-1 era diferent, fet que caldrà millorar en la FM-2. Ara bé, també cal tenir en compte que les necessitats constructives requereixen poder entrar el rotor dins l'estator un cop ja s'han realitzat les soldadures.

3. Propostes de modificació

3.1. Diàmetre dels toroïdals

Com s'ha comentat en el punt 2.3 la primera modificació en el disseny de la FM-2 hauria de ser d'alterar la col·locació dels dos toroïdals per no només reduir, sinó també per igualar les pèrdues al coure. Donat que, per raons constructives, el rotor s'ha de poder introduir dins l'estator amb els toroïdals ja col·locats, una primera alternativa a la FM-1 seria l'augment de mida dels dos toroïdals fins a un diàmetre superior al del rotor. D'aquesta manera es simplifica enormement la construcció i el manteniment, podent introduir o treure el rotor per qualsevol dels dos costats de l'estator. Així mateix amb un augment de la mida dels toroïdals, la quantitat de coure necessària a l'inductor secundari entre toroïdal i estator seria molt menor.

Dins de la proposta d'augmentar la mida dels dos toroïdals fins a un diàmetre igual o superior al del rotor, tot i semblar millorar les prestacions, condueix a un disseny "sense sentit" en el qual s'obté una màquina elèctrica on el pes dels toroïdals iguala o inclús supera al del propi rotor-estator. Dins de les possibles aplicacions que pot tenir un motor elèctric, el pes sol ser un paràmetre força crític, i obtenir una màquina amb un pes d'un factor de dos respecte a la competència no pot ser una opció viable. Per tant caldria buscar una nova solució pel disseny dels toroïdals i la reducció de la longitud del coure.

3.2. Ranurat estatòric

El segon tema a estudiar seria el format de les ranures en l'estator. Donat que aquest disseny és una millora de la FM-1, i tenint en consideració les premises considerades en el punt 2.3 la FM-2 tindrà un ranurat estatòric amb les dimensions més favorables trobades per Francisco Moreno.

Partint de la premisa amb la que havia treballat la FM-1, de 2 ranures pel pol i fase, les opcions per als caps de bobina estatòrics (o d'inductor secundari) serien les de realitzar un bobinat concèntric o un bobinat imbricat.

El bobinat concèntric es caracteritza per tenir un tub més llarg que l'altre de manera que siguin concèntrics.

En el bobinat imbricat la longitud dels dos tubs per cada ranura es exactament la mateixa, però ambdós tubs no són concèntrics. En quant a la longitud del coure per cada ranura, en aquest cas és exactament la mateixa, fet que semblaria millor al ranurat concèntric. La configuració imbricada planteja una major dificultat a l'hora de mecanitzar les unions entre els tubs, fet que faria decantar un ranurat concèntric en la FM-2. La figura 3.1 mostra el disseny per una ranura del ranurat concèntric a l'esquerra i l'imbricat a la dreta.

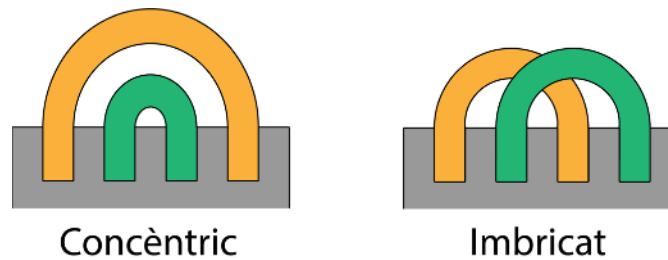


FIG. 3.1: TIPUS DE CAPS DE BOBINA

3.3. Circuit hidràulic

Les màquines de referència (tant la VF-1 com la FM-1) no tenen ferro al rotor, fet que requereix una major densitat de corrent per generar el camp magnètic motriu. Aquest augment de densitat de corrent suposa per tant, un augment en la calor generada per efecte Joule. Ens trobem doncs en una tipologia de màquines rotatives on és imprescindible la refrigeració forçada, ja sigui per aire, aigua o un altre fluid refrigerant.

Com el bobinat estàtic està format per tub de coure foradat, la millor opció és la d'utilitzar el propi tub per la circulació de fluid. Donada la gran superfície convectiva, la refrigeració de la màquina hauria de ser, a priori, molt eficaç.

Aquesta refrigeració podria estar formada per, o bé un circuit tancat, o bé un circuit obert. Un circuit tancat permetria l'utilització de la màquina elèctrica rotativa per a qualsevol ús, però requeriria un disseny més acurat del circuit hidràulic. Un circuit obert es podria realitzar si el motor s'utilitza en aplicacions marítimes.

Cal recordar que, en tractar-se d'una màquina sense ferro al rotor, les forces de reluctància són pràcticament nul·les. Les forces a les quals estan sotmesos els coixinets són doncs, molt menors que en una màquina convencional. Podria estudiar-se d'utilitzar el propi circuit hidràulic com a coixinet hidrodinàmic, portant la sortida del fluid a l'espai entre rotor i estator (inductor secundari).

4. Disseny basat en la màquina de Gramme

4.1. Història de la dinamo de Gramme

Arribat un punt en el qual hi havien més flancs oberts que sol·lucions reals, el director del projecte va proposar de redirigir l'estudi del motor d'inducció, cap a la base electromagnètica històrica, d'una màquina de continua, en la que es magnetitzava amb els conductors sobre el nucli magnètic toroïdal rotòric d'una forma particular, mantenint això si, les dues fases amb les que s'havia decidit treballar.

Michael Faraday, a partir dels experiments anteriors de François Arago, entre els anys 1830 i 1832 va observar que un conductor elèctric movent-se dins d'un Camp magnètic generava una diferència de potencial. Aprofitant aquest efecte, va construir el primer generador electromagnètic el qual constava d'un disc de coure que girava entre els dos extrems d'un iman. Hippolyte Pixii aprofitant el principi de Faraday va utilitzar un iman permanent que girava mitjançant una manivela, de manera que els pols Nord i Sud de l'iman passaven a girar aprop d'un nucli de ferro amb cable elèctric embolicat (formant un nucli i una bobina).

El principal problema tant del Disc de Faraday com de la dinamo de Pixii, era que generava pics de corrent quan els pols Nord i Sud de l'iman passaven aprop de la bobina, però altrament no generava pràcticament res. Antonio Pacinotti va solucionar aquest problema a partir de substituir la bobina giratòria per una de toroïdal enrollada al voltant d'un anell de ferro. D'aquesta manera sempre hi havia influència magnètica entre la bobina i els imans.

No va ser fins la dècada de 1870 que Zénobe Gramme va portar les idees dels seus antecessors cap al disseny dels generadors comercials, creant l'anomenada dinamo de Gramme. Famosa per el seu rendiment, millor que les màquines de la époque i per la estabilitat que donava a les lampares d'arc voltaic, per el fet de que el rotor feia de inductància sèrie, estabilitzant els arcs.

Posteriorment es varen usar bobines d'anada i tornada sobre un nucli magnètic rotòric ranurat, formant el que avui es coneix com la màquina de corrent continua (o corrent directe).



FIG. 4.1: DINAMO DE GRAMME

4.2. Particularitats del bobinat de Gramme

Les bobines tradicionals están formades per dos conductors actius, que formen el pol d'enllaç amb el rotor, a dins les ranures del estator, units per sengles caps de bobina, que tanquen el circuit elèctric. Això resulta molt eficient amb rotors ferromagnètics, però és discutible amb rotors conductors, laminars i sense ferro, sobretot si la llargada del cap de bobina supera les dels conductors actius, com passa en algunes geometries.

L'anell de Gramme, sols té un conductor actiu per espira, doncs la tanca per darrera de la culata del estator. Aquesta despesa de coure, considerada excessiva a les màquines actuals, pren sentit si aquest tram, permet magnetitzar el conductor actiu, fent-lo passar per un transformador de corrent.

Aquesta és l'escència electromagnètica que es pretén assajar.

4.2.1. Experiment previ

Per avaluar la viabilitat electromagnètica de la reflexió anterior, es proposa magnetitzar una espira del tub de coure, emprat en treballs anteriors, tancada en curtcircuit sobre si mateixa, embolicant la culata del estator i passant per una ranura similar a la de FM-1, és a dir formant una espira tipus Gramme. És una configuració amb llargada i secció de coure semblant a la del circuit definitiu, però amb un major entreferro (veure figura 4.2).

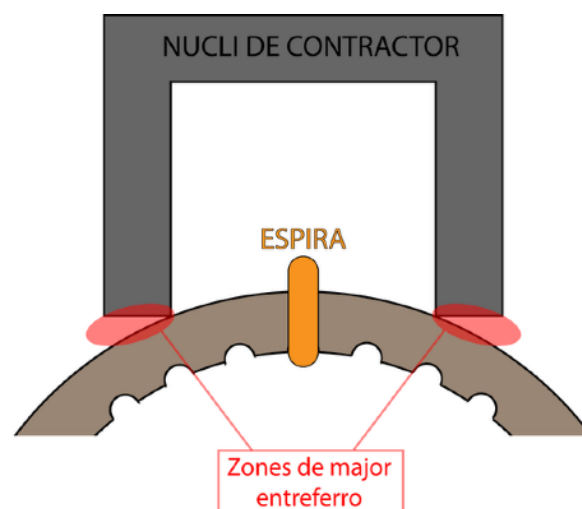
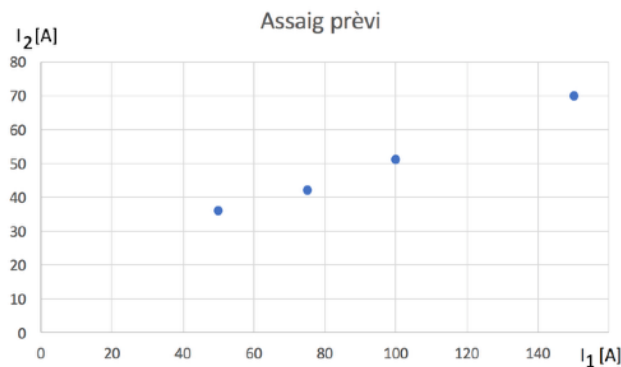


FIG. 4.2: ESQUEMA DE L'ASSAIG REALITZAT

Amb tres nuclis reciclats de contactors, abraçant el retorn per fora de la culata de la espira de tub de coure, es simula el circuit magnètic. En magnetitzar per una espira amb 150 A, 50Hz, s'assolien corrents de uns 70 A. Aquest fet anima a fer un disseny més acurat, que minimitzaria la llargada de l'inductor secundari.

Es van realitzar diversos assajos, els resultats dels quals es mostren a la taula 4.1 i al gràfic 4.1.



GRÀFIC 4.1: RESULTAT D'INTENSITATS ASSAJADES

I_1 [A]	I_2 [A]
150	70
100	51
75	42
50	36

TAULA 4.1: VALORS DE LES INTENSITATS

Apart de l'escurçament de la llargada del coure en l'inductor secundari, aquest experiment permet demostrar que, tot i el gran entreferro (zona vermella de la figura 4.2) en l'assaig, l'acoblament magnètic resulta suficientment bo per induir un corrent significatiu a les espirs de l'inductor secundari. El disseny definitiu redueix l'entreferro del transformador d'intensitat a unes poques centèsimes (corresponents a un ajust H7), per a poder fer el muntatge del estator dins el nucli magnètic de l'inductor primari. És d'esperar doncs, que l'acoblament electromagnètic doni millors resultats.

4.2.2. Avantatges respecte als antecessors

El nucli magnètic estatòric és el mateix que la FM-1, de manera que els assajos siguin comparables. La diferència és que es canviaria l'estructura dels dos toroïdals per la de nuclis en U, que tanquen el circuit magnètic per la part exterior de la culata estatòrica.

Cada ranura tindria un transformador d'intensitat propi, amb un primari de moltes espirs i fil prim. El fet de tenir un transformador d'intensitat individual per cada ranura permet activar o desactivar aquella ranura en tot instant, per simple commutació dels 72 inductors primaris. L'avantatge és que permetria poder controlar el número exacte de pols i vies en paral·lel per pol, en cada moment. Teòricament, permetria controlar la corba parell velocitat en tot instant.

Aquesta capacitat de canviar la configuració de bobines, no sols permet canviar el número de parell de pols, sinó que posa en qüestió la necessitat de la transformació Scott. A més a més, en aplicacions de vehicles (terrestres o marítims), el fet de poder controlar el parell motriu en tot moment podria tenir grans avantatges.

Per simplificar el sistema de l'inductor primari i disminuir la resistència del inductor secundari, es decideix posar conjunts de dues ranures, amb els dos tubs de l'inductor secundari en curtcircuit i paral·lel entre si, magnetitzats pel mateix transformador de corrent. Això fa que l'inductor primari estigui format per 36 bobines inductores primaries.

5. Construcció del prototip

El disseny de la màquina elèctrica que es pretén construir consta de 3 elements ben diferenciats: rotor o induït, inductor primari i inductor secundari.

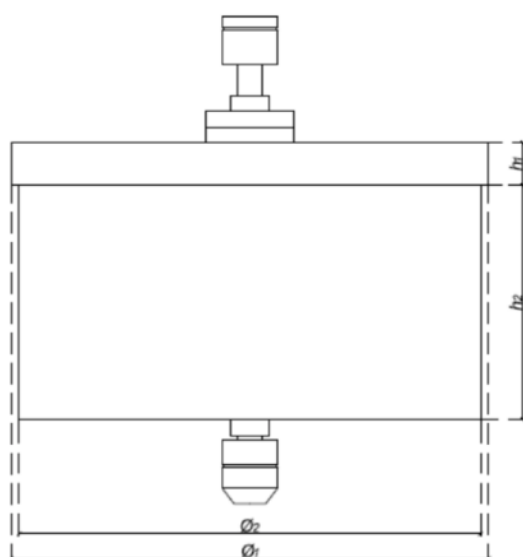
5.1. Rotor o induït

El rotor que s'utilitzarà per la FM-2 serà exactament el mateix que l'utilitzat per la FM-1, de tal manera que els resultats obtinguts siguin comparables.

Es tracta d'un bloc massís d'aliatge alumini-zinc BLM7075-T6 comprat a la comercial Balumer. Inicialment estava destinat a la indústria del transport (nàutica, automobilisme, aeroespacial) degut al seu elevat rati de resistència-densitat, sobretot per peces que hagin d'estar sotmeses a compressió. Presenta una millor resistència a la fatiga que molts altres metalls, es mecanitza amb facilitat i presenta bona resistència a la corrosió. Com a inconvenient hi hauria el fet que l'alumini no és un material soldable, però pel cas d'un rotor no és necessari.

La presència de material aleants com són el coure, magnèsi o el zinc converteixen al material en un aliatge tractable tèrmicament, i susceptible a l'enduriment per envelliment (lletra T de l'aliatge). Els nombres posteriors (en aquest cas el 6) fan referència al tipus exacte de tractament tèrmic al que es pot sotmetre.

En el cas del rotor en qüestió, es va sotmetre a una primera fase en un procés de solubilització i temperat en la que es va generar una solució sobresaturada. En una segona fase, es produïa un envelliment artificial en un forn a una temperatura d'uns 120°C. El precipitat bàsic que es genera en aquest tractament tèrmic és MgZn₂. L'elevada solubilitat del zinc i el magnèsi a l'alumini fa possible que es generin un alt nombre de precipitats, incrementant així la duresa de l'aleació.



<i>Material</i>	-	Alumini BMB7075-T6
<i>Pes [kg]</i>	m_r	28,00
<i>Diàmetre exterior [mm]</i>	\varnothing_1	300,00
<i>Diàmetre interior [mm]</i>	\varnothing_2	290,00
<i>Altura exterior [mm]</i>	h_1	26,75
<i>Altura interior [mm]</i>	h_2	148,00

TAULA 5.1: DIMENSIONS ROTOR FM-1

FIG. 5.1: ESQUEMA ROTOR FM-1 & FM-2

5.2. Inductor primari

La tasca de l'inductor primari és la d'induir corrent a les espirs de l'inductor secundari, el qual induirà el rotor. La conformació d'aquest inductor primari requeria d'una alta precisió, amb la qual cosa es va decidir subcontractar-la a Laboratorio Electrotécnico S.C.L. (d'ara en endavant Laboratorio Electrotécnico o LE), corporació amb molta experiència en transformadors i bobinat, els quals tenen la seu a Cornellà del Llobregat, Barcelona.

La idea inicial per la conformació de l'inductor primari era la d'obtenir un conjunt de 36 peces individuals que es poguessin encaixar entre si. D'aquesta manera es facilitava enormement el muntatge del conjunt format per inductor primari i inductor secundari. Aquest inductor primari, hauria de ser un conjunt format per moltes voltes de fil prim (per treballar amb intensitat baixes) i induir un alt corrent a l'espira de l'inductor secundari.

El plànol inicial es pot veure a la figura 5.2 (peça individual) i a la figura 5.3 (conjunt).

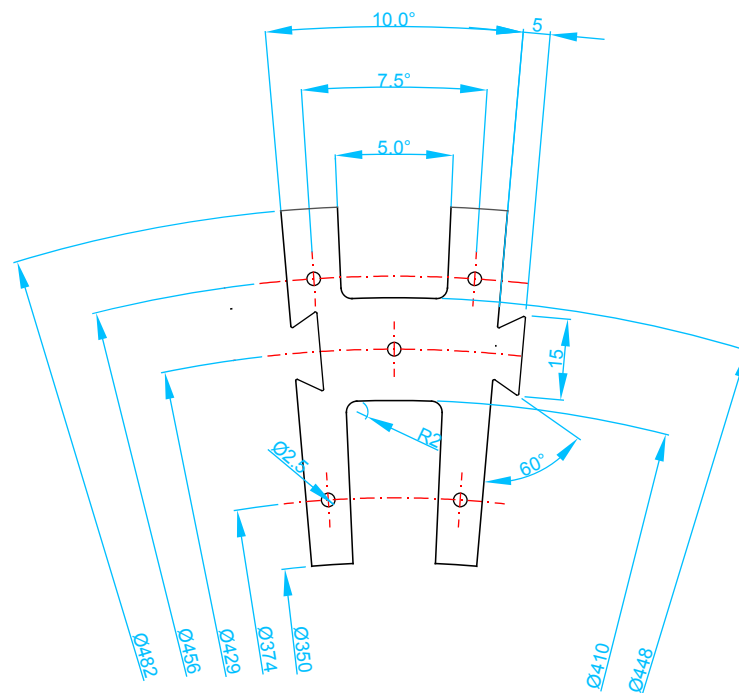


FIG. 5.2: PLÀNOL DE LA PEÇA INDIVIDUAL PER L'INDUCTOR PRIMARI

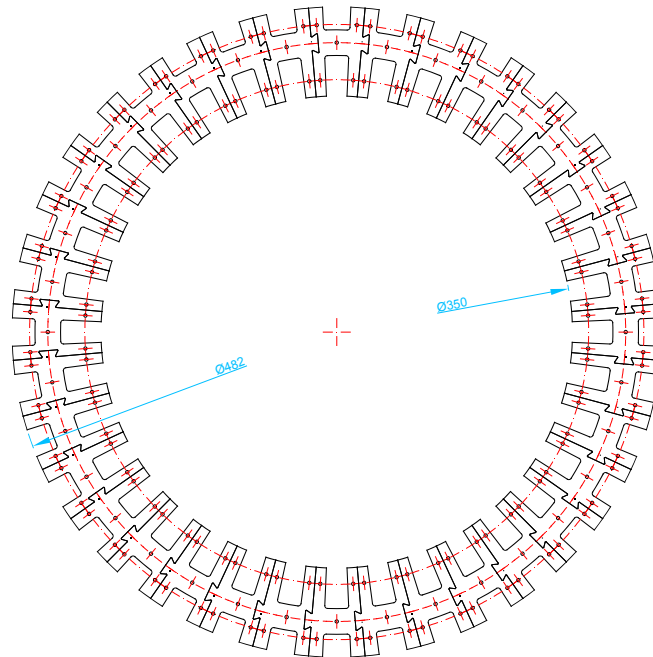


FIG. 5.3: PLÀNOL DEL CONJUNT MONTAT DE L'INDUCTOR PRIMARI

Tot i que aquest primer disseny inicial semblava molt bo, el cost de fabricar les 36 peces de manera individual augmentava en gran mesura el seu cost, pel número de talls addicionals a realitzar. Alhora també generava un joc entre les peces difícilment calculable, que augmentava l'entreferro entre inductors primari i secundari. Finalment es va decidir conformar-lo en una sola peça. Pel muntatge, teòricament s'hauria de poder entrar sense problema des de dalt. Es pot veure el plànol de l'inductor secundari definitiu a la figura 5.4.

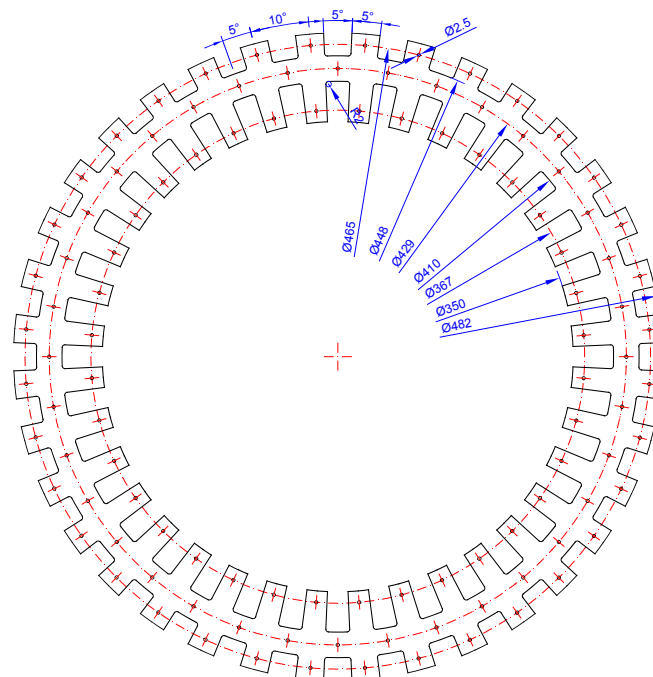


FIG. 5.4: PLÀNOL DEFINITIU DE L'INDUCTOR PRIMARI

El material del nucli massís de l'inductor primari és acer magnètic.

A aquest nucli, calia afegir-li el bobinat del fil de coure pel qual circularia corrent, i l'aïllant entre ambdós. L'aïllant es conforma a partir de material plàstic a través d'impressió 3D. L'avantatge de l'impressió 3D és que permet la fabricació d'elements de geometries complexes per poques tirades, com és el cas a tractar. La taula 5.2 mostra les característiques de l'inductor primari (nucli i espiras), i la figura 5.5 mostra el bobinat i l'aïllant en una de les ranures.

Altura màxima bobina	45,8	mm
Altura interior bobina	17,4	mm
Altura media bobina	31,6	mm
Fondo interior bobina	61,6	mm
Fondo bobina	90,0	mm
Fondo medio bobina	75,8	mm
Perímetro exterior	271,6	mm
Espira media	214,8	mm
Ancho bobina	18,7	mm
Sección bruta	264,8	mm ²
Sección neta	208,0	mm ²

Diámetro hilo	0,6	mm
Sección hilo	0,283	mm ²
Número de espiras	736	espiras
Longitud hilo	0,158	km
Peso hilo	2,5136	kg/km
Peso bobina	0,397	kg

Número de bobinas	36	
Peso total de cobre	14,3	kg

**TAULA. 5.2: CARACTERÍSTIQUES INDUCTOR PRIMARI
SEGONS LE**

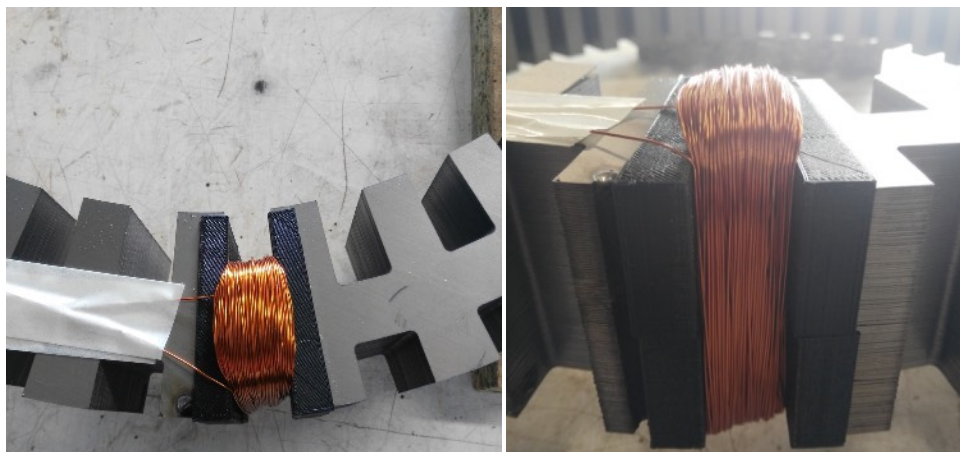


FIG. 5.5: IMATGES DEL BOBINAT EN UNA RANURA

Degut a la geometria de la ranura, tot i que els càlculs estimaven 736 espiras, finalment només s'hi van poder col·locar 570. Aquest fet es deu a que la ranura en tenir forma trapezoidal i que l'entrada del fil es fa a través de la part estreta, no permet deixar el fil de forma ordenada, impeding la cabuda de més espiras.

5.3. Inductor secundari

La funció de l'inductor secundari és de generar un parell sobre el rotor a partir dels corrents que rep de l'inductor primari, de tal manera que el parell al rotor es transmeti a la càrrega.

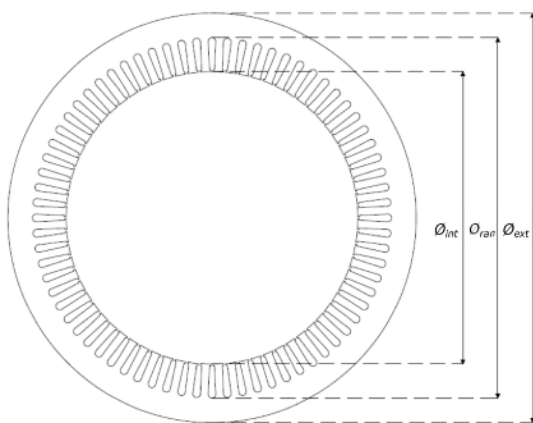
L'inductor secundari està format pel paquet magnètic (planxa magnètica i les espires) i pel circuit de refrigeració.

5.3.1. Planxa magnètica

La planxa magnètica, és igual a la que en la FM-1 s'utilitzava com a estator. La planxa magnètica provenia del taller Puig Pol de Barcelona, que estava destinada a la construcció d'un generador elèctric eòlic amb estator trifàsic i rotor interior d'imans permanents. La figura 5.6 mostra l'esquema original de la planxa, amb les seves dimensions característiques. El material de la planxa és acer magnètic.

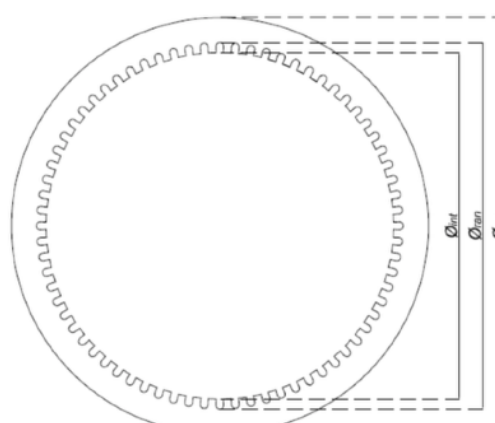
La planxa magnètica que s'utilitza com a estator en la FM-1 i com a inductor secundari a la FM-2 es fabrica a partir de moltes xapes d'acer magnètic aïllat per una sola banda, de gruix 0,4mm. En el cas a tractar es van troquelar totes les xapes a premsa fins a obtenir una sola peça. Un cop troquelat, es va recobrir el conjunt amb un vernís contra la corrosió.

Tal i com s'ha comentat al punt 2.2.4, Francisco Moreno va veure que si es retallaven les ranures i es feien més obertes hi havia una major penetració de les línies de flux, obtenint valors de parell útil superiors. Així doncs, continuant amb les millores proposades a la FM-1, es va realitzar un tall a les ranures de la planxa magnètica original, fins a deixar-les amb les dimensions proposades per Francisco Moreno (veure figura 5.7).



Número total de ranures	N_{ran}	72	Ranures
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	250,00	mm
Diàmetre al fons de la ranura	\varnothing_{ran}	308,00	mm
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	350,00	mm
Gruix de la planxa	h_{planxa}	0,35	mm

FIG. 5.6: DIMENSIONS ORIGINALS ESTATOR FM-1



Número total de ranures	N_{ran}	72	Ranures
Diàmetre interior	\varnothing_{int}	291,50	mm
Diàmetre al fons de la ranura	\varnothing_{ran}	308,00	mm
Diàmetre exterior	\varnothing_{ext}	350,00	mm
Gruix de la planxa	h_{planxa}	0,35	mm

FIG. 5.7: DIMENSIONS FINALS ESTATOR FM-1

El tall es va demanar al centre CIM, el qual el va realitzar mitjançant electroerosió amb fil. El tall per electroerosió amb fil es realitza amb un filferro electrolític pel qual s'hi fa circular corrent. Alhora a la peça s'hi aboca un flux de fluid dielèctric, de tal manera que permet tallar metalls. Aquest filferro, al moures realitza un tall en tota la seva trajectòria (veure figura 5.8).

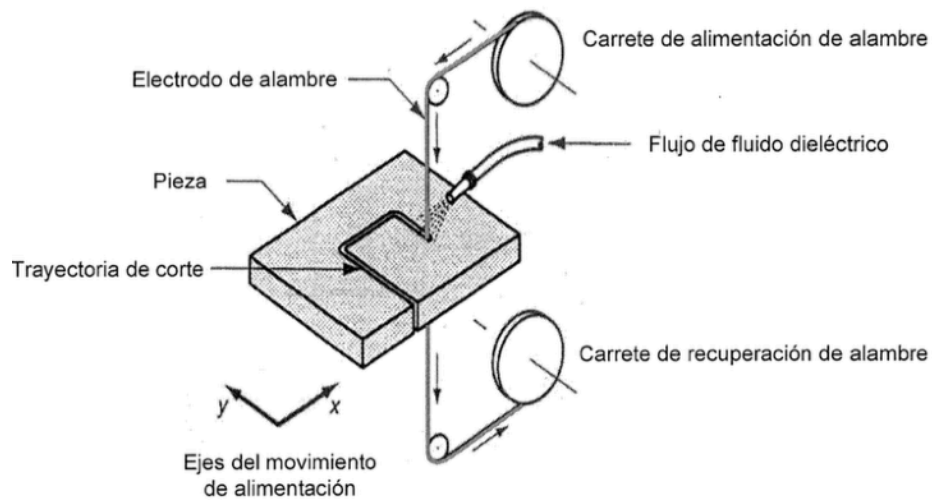


FIG. 5.8: ESQUEMA DE TALL PER ELECTROEROSIÓ AMB FIL

L'operació en total va durar 30h, deixant la planxa amb les dimensions sol·licitades, amb un pes total de 25,2 kg. També es va guardar el sobrant de material tallat, per si en un futur es pogués utilitzar en operacions de millora, o en cas contrari per portar-lo a reciclar. Cal destacar que el material sobrant eren làmines de gruix 0,4mm, degut a que al realitzar el tall es van desprendre les diferents capes de xapa que s'havien utilitzat per conformar l'estator a través del troquelat (veure figura 5.9).



FIG. 5.9: VIRUTA OBTINGUDA DE L'ELECTROEROSIÓ

5.3.2. Espires

A diferència del bobinat típic de les màquines d'inducció, la FM-2 monta un bobinat com el de la màquina de Gramme. Aquest fet obliga a una conformació pròpia de les espires, doncs en cap altre taller estan acostumats a fer aquests tipus de bobinats.

El material utilitzat per les bobines és coure, partint d'un tub de coure recuit de 1/4". S'utilitzen tubs buits per dins, doncs es pretén utilitzar aquest mateix tub per la refrigeració dels circuits. En total es van utilitzar uns 20m de tub de coure (consistent en dos rotllos de 15m adquirits a Pecomark) per les espires (veure figura 5.10).



FIG. 5.10: BOBINA DE TUB DE COURE RECUIT 1/4"

Per la conformació de l'espira, el primer pas consisteix en tallar 211,6mm del tub de coure amb un tallatubs. Donat que el tub provenia d'una bobina enrollada, per poder obtenir un tub completament recte es realitza un redreçat consistent en percussions per caiguda amb un extrem fix (veure figura 5.11).



FIG. 5.11: TUB TALLAT I REDRECAT

El segon pas és el del doblegat del tub. Per fer-ho s'utilitza un doblegador que també ha estat conformat a l'escola. El doblegador va estar dissenyat i fabricat per Victor Fuses en la construcció de la VF-1. Per les espires de la FM-2, l'extrem lliure del tub es situa a 73,6mm del suport de l'estri, i es realitza un pleg de 180°. En el procés de doblegat, l'espira per la seva planitud, i cal realitzar un petit premsat perquè el pla de l'espira sigui horitzontal (veure figura 5.12).



FIG. 5.12: TUB DOBLEGAT EN FORMA D'ESPIRA

En tercer lloc es realitza una neteja de les rebaves que es produeixen en el tallat dels tubs. Primer s'utilitza una llima d'interiors per ampliar el diàmetre del forat que s'ha format al tallar-lo, i després s'utilitza una llima d'exterior per pulir les entrades del tub. Si cal es fa una segona passada amb la llima d'interior per assegurar-se que no quedin trossos de coure penjant. Es pot veure la diferència entre l'abans i el després a la figura 5.13.

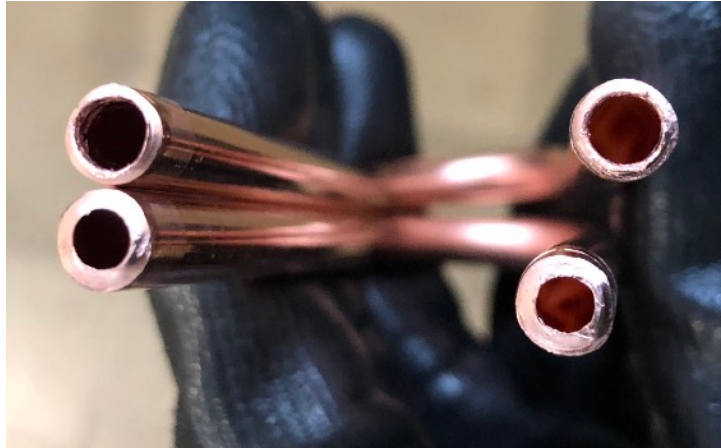


FIG. 5.13: ESPIRA AMB REBAVA (INFERIOR) I SENSE REBAVA (SUPERIOR)

El quart pas consta d'un premsat de la pota curta de l'espira. Per poder entrar correctament a les ranures de la planxa magnètica, cal que el tub de coure perdi diàmetre, el qual s'obté per premsat amb un cargol de banc. Victor Fuses en la construcció de la VF-1 també es va trobar amb el mateix problema, i va fabricar un element auxiliar pel premsat correcte de les espiras (veure figura 5.14).



FIG. 5.14: MATRIU SUPERIOR I INFERIOR PEL PREMSAT DE LA POTA CURTA

Per fer-ho s'introduïa la pota curta a la matriu superior de l'imatge i es tapava amb la matriu inferior. Amb el cargol de banc s'apretava i es deixava premsat un mínim de dos segons per garantir la plasticitat de la deformació. A continuació s'afluixava el cargol i s'extreia l'espira de la matriu.

En cinquè lloc es realitza un procés de verificació, en el qual es procura que totes les espires tinguin les mateixes dimensions $\pm 2\text{mm}$. Les que no compleixen aquestes especificacions es guarden per reciclar (veure figura 5.15).

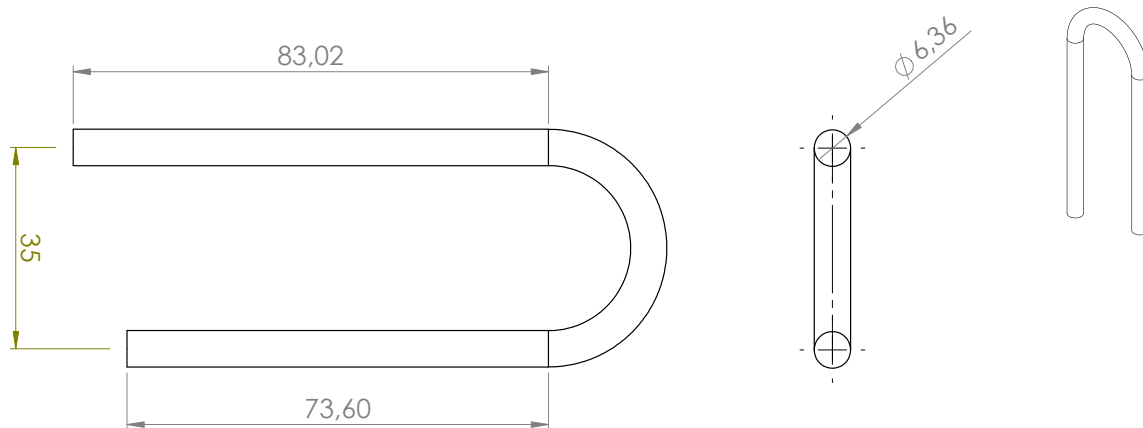


FIG. 5.15: PLÀNOL ESPIRES

Aquest procés s'utilitza per la conformació de les 72 espires que aniran a les 72 ranures disponibles de la planxa magnètica. El procés de fabricació per obtenir les 72 espires vàlides va durar unes 12h. El pes total de cada espira es trobava al voltant dels 6,8g.

Per simplificar l'esquema de l'inductor secundari, es decideix que les espires s'uneixin en curtcircuit en grups de dos, formant un total de 36 conductors actius diferents. Aquest fet té l'avantatge que l'inductor primari només haurà d'estar format per 36 bobines inductores.

El curtcircuit es realitza amb petites plaques de coure soldant les 4 potes entre 2 espires contigües. Aquestes plaques s'obtenen tallant un passamà de coure de 6,9 mm de gruix, i posteriorment realitzant múltiples taladrats per fer els forats. El disseny de les espires es pot veure a la figura 5.16.

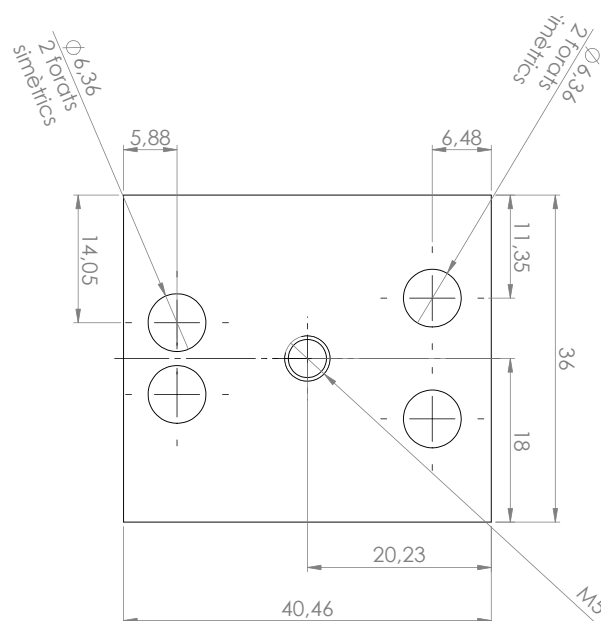


FIG. 5.16: PLÀNOL DE LES PECES DE CURTCIRCUIT

A l'hora de realitzar els talls, es va utilitzar una serra de mà amb la planxa de coure fixada al cargol de banc, realitzant els forats amb 3 passades de taladre, augmentant en cada un el diàmetre) fins arribar a les dimensions nominals. Les broques utilitzades eren d'acer ràpid (HSS) de la marca IZAR, de diàmetres 5mm, 6mm i 6,5mm (nominal).

Aquests taladrats es realitzaven amb una plantilla d'acer conformada de la mateixa manera que posteriorment es feia amb la de coure, de manera que tots els forats quedessin al mateix lloc. Tot i això els talls obtinguts no tenien prou qualitat dimensional, obtenint intervals de tolerància massa grans i un acabat superficial a la zona del tall no adequat per les característiques necessàries de la màquina.

Les peces de curtcircuit són una part crítica del paquet magnètic, doncs han de curtcircuitar les dues espirals del mateix conductor, però sense tocar-se amb cap altre element (ni altres plaques, ni amb la planxa magnètica). Per això es va decidir demanar la fabricació al Taller Mecànic de l'ETSEIB.

El Taller Mecànic per realitzar els talls va utilitzar un procés semblant, però en comptes d'una plantilla va utilitzar una matriu (veure figura 5.17). A més a més, amb l'experiència dels seus operaris i la qualitat de les màquines, les peces obtingudes van ser d'una gran qualitat. Un cop el Taller Mecànic va donar les plaques tallades, es van enumerar a cop de maça amb uns punxons de número i es van soldar a les espirals.



FIG. 5.17: MATRIU UTILITZADA PEL TALLER MECÀNIC

Per evitar el curtcircuit de les espirals amb la planxa magnètica (estator) calia col·locar algun tipus d'aïllant. Es va optar per introduir l'espira dins d'un teixit aïllant format per un trenat tubular de fibra de vidre del qual ja se'n disposava d'un rotlle prou gran al laboratori de l'Escola. El problema d'aquest embolcall era que el seu diàmetre interior era lleugerament inferior al exterior del tub i era molt difícil de fer-lo entrar. A més a més, el diàmetre exterior de l'aïllant era lleugerament superior al de les ranures, la qual cosa dificultava molt el muntatge i es desfilava durant el procés (veure figura 5.18).



FIG. 5.18: ESPIRA AMB TRENAT TUBULAR DE FIBRA DE VIDRE

Al final es va decidir substituir el teixit aïllant per làmines d'alamida (Nomex o paper aïllant), el qual es va tallar en rectangles de 20x75mm i es va col·locar dins les ranures, entre planxa i espira. Per la part exterior de la planxa magnètica també es van col·locar làmines de Nomex per evitar el curtcircuit (veure figura 5.19).



FIG. 5.19: LÀMINES DE NOMEX JA COL·LOCADES A L'INDUCTOR SECUNDARI

Donat que el Nomex no aguanta tant bé les altes temperatures com si ho fa la fibra de vidre, es corria el risc que aquest es cremés, deixant en contacte nucli i espira. Per això, a l'hora de realitzar el muntatge calia anar comprovant amb un Megher, després de cada soldadura, si hi havia aïllament elèctric. Només es van haver de substituir 6 làmines de Nomex (tasa de reparació inferior a un 10%), gràcies al fet que el procés de soldadura era ràpid i que aquesta no es realitzava directament sobre el paper aïllant.

5.4. Muntatge

El muntatge es va realitzar al laboratori de projectes d'electrotècnica de l'ETSEIB. Pel que fa a la fixació de l'inductor secundari, es va decidir que fós interna per poder realitzar les soldadures de la manera més còmode possible. Per fer-ho, es va agafar un banc d'acer que disposava de dos suports verticals, als quals s'hi va reposar una barra també d'acer. Aquesta barra d'acer es va introduir dins d'un cilindre de fusta, que es va recobrir d'una capa de teixit esmorteïdor (veure figura 5.20).

L'interior de l'inductor secundari, es trobava en contacte amb el exterior del cilindre de fusta, que tot i no ser concèntrics permetia fixar-lo per poder realitzar el muntatge i les soldadures.

Abans de soldar, primer es pulia l'extrem de les espirals per tal d'eliminar restes d'òxid que s'haguessin pogut formar, les quals podrien dificultar la soldadura. Un cop estaven pulides, es feien passar les 2 potes curtes (les premsades) de les dues espirals que formarien el mateix conductor actiu, per les ranures de l'inductor secundari, i s'hi col·locava l'element de curtcircuit. Amb l'element col·locat s'utilitzava una pasta antioxidant per facilitar la soldadura (es va utilitzar la Tacovisión, que contenia clorur de zinc) i es començava a soldar. El material utilitzat era estany-plom (60% d'estany), el qual permet realitzar soldadures amb temperatures al voltant dels 300°C, tot i que l'aparell de soldar aportava una temperatura a la punta del soldador de 350°C. Les soldadures es realitzaven tant per l'interior com per l'exterior, procurant no tenir un excel·lent d'estany el qual podria dificultar tant la circulació de les línies de flux, com el muntatge de les següents peces de curtcircuit. El conjunt muntat i soldat es pot veure a les figures 5.21 i 5.22 (vistes superior i inferior).

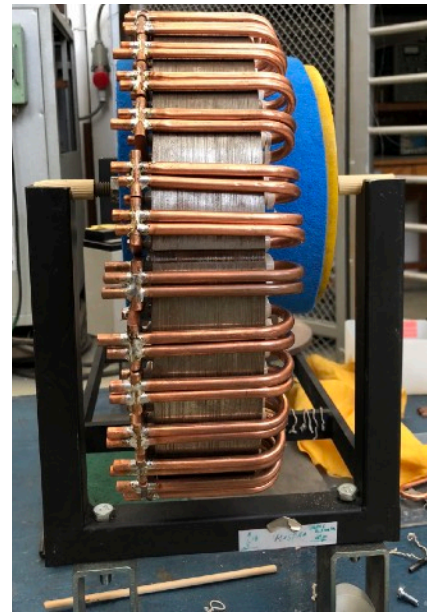


FIG. 5.20: SUPORT DISSENYAT PEL MUNTATGE DE L'INDUCTOR SECUNDARI

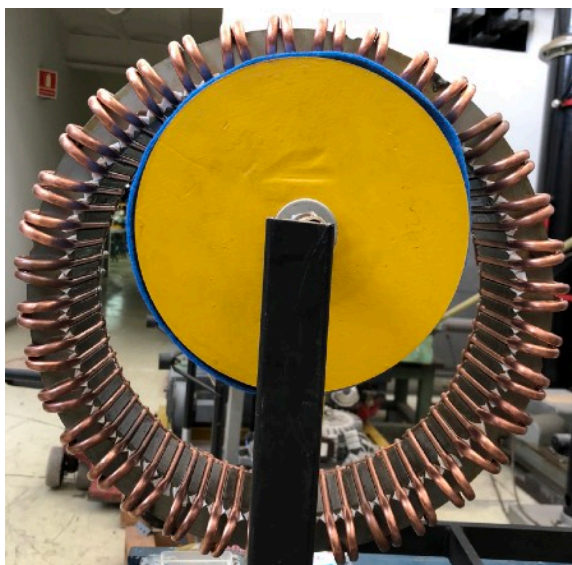


FIG. 5.21: INDUCTOR SECUNDARI VISTA SUPERIOR



FIG. 5.22: INDUCTOR SECUNDARI VISTA INFERIOR

Com ja s'ha comentat, el punt crític de la soldadura era la de no fer malbé el paper aïllant, per tant s'intentava que aquesta fos el més ràpida possible. Sempre després de cada soldadura calia comprovar l'aïllament elèctric entre la planxa magnètica i l'espira, per la qual cosa s'utilitzava un medidor Megher. Una de les potes es connectava a l'espira i l'altre al nucli.

Arribat en aquest punt, el projecte topava amb dues disquisicions: per una part no es disposava de l'inductor primari per part del proveïdor, i per un altre part, l'estudiant s'enfrontava a la dificultat de dissenyar uns utilitatges que permetessin el muntatge del conjunt.

La complexitat del bobinat que es volia realitzar a l'inductor primari, havia endarrerit molt els temps d'entrega previstos de l'inductor primari. A data de presentació del projecte només s'havia pogut bobinar una de les 36 ranures que disposava, i s'estima que fins a finals de juliol de 2018 no es disposarà de la peça acabada.

A més de mancar el inductor primari, un cop es disposés d'aquest, encara caldria realitzar dos operacions addicionals: muntar el conjunt i dissenyar, construir i muntar el circuit hidràulic. Per realitzar aquestes operacions cal tenir uns utilitatges que permetin la subjecció i manipulació de tots els elements, els quals no tenen un disseny trivial, i encara menys una construcció fàcil.

Per aquests motius, juntament amb el fet que l'estudiant requeria el títol del TFM¹, es va decidir deixar fora de l'abast del projecte, tant el disseny i fabricació dels utilitatges, com la realització dels assajos corresponents.

¹ Per motius laborals, l'estudiant requeria obtenir el títol del Màster d'Enginyeria industrial com a màxim al mes d'agost de 2018.

6. Planificació

La duració del projecte ha estat de 10 mesos, des de principis de setembre de 2017 fins a finals de juny de 2018. El procés de disseny va ser de 1 mes, tot i que es van redefinir múltiples conceptes al llarg del treball, en tant que la construcció va suposar 8 mesos. L'esquema de Gantt de la figura 6.1 mostra les diferents fases per les quals ha anat passant la FM-2, i la taula associada a la taula 6.1.

Nom de la tasca	Data d'inici	Data de fi	Duració (dies)
Proposta de TFM	5/9/17	9/9/17	4
Disseny per inducció	9/9/17	10/11/17	62
Disseny per Gramme	10/11/17	18/4/18	159
Electroerosió al centre CIM	6/10/17	11/10/17	5
Fabriació inductor primari LE	14/11/17	15/7/18	243
Conformació espines	5/5/18	10/6/18	36
Peces de curtcircuit	10/5/18	7/6/18	28
Muntatge i soldadura	5/6/18	18/6/18	13
Matrícula TFM	12/2/18	14/2/18	2
Redacció memòria	15/10/17	18/6/18	246
Entrega memòria	18/6/18	21/6/18	3
Presentació oral	2/7/18	13/7/18	11

TAULA 6.1: TASQUES, DATES I DURACIÓ DE L'ESQUEMA DE GANTT

La primera idea amb la que es va treballar va ser la d'anar a fer millores específiques sobre la FM-1, les quals es citen al punt 3 (Propostes de modificació). En aquest punt no es pretenia canviar l'ideologia de la màquina. Es va treballar aproximadament dos mesos en com realitzar les millores, però sempre apareixien nous inconvenients, fins que el director del projecte va decidir redirigir l'estudi cap al disseny semblant a l'anell de Gramme.

L'elaboració per disseny de Gramme tampoc va ser fàcil, doncs la màquina que es pretenia construir no s'havia fet mai. Van caldre moltes modificacions i redissenys fins a la màquina que finalment s'ha acabat construint. Si el funcionament segueix les expectatives creades, i la base teòrica només ho podran dir els assajos a realitzar en un futur.

Tot i això, ja en el disseny per màquina d'inducció "convencional" es van realitzar tasques útils per la FM-2, com va ser el tall de les ranures sobre l'inductor secundari (estator en aquell moment). La planxa magnètica va estar un total de 5 dies al centre CIM, en el qual es va realitzar el tall per electroerosió amb fil.

A partir del punt en el qual es va decidir realitzar un disseny per màquina de Gramme, es va encarregar l'inductor primari al Laboratorio Electrotécnico (LE). A data d'entrega de memòria encara no s'ha rebut, tot i que aparentment sembla que ja està pràcticament finalitzat. S'estima que s'entregarà cap a mitjans de juliol.

Mentre s'esperava al inductor primari, es van realitzar les operacions auxiliar que requeria el inductor secundari (que si es trobava al laboratori de projectes). Es va realitzar la conformació de les espires amb la metodologia citada, i es van fer proves amb les peces de curtcircuit. En el punt en el qual es va veure que aquestes peces de curtcircuit no s'obtenien amb la qualitat desitjada, es va demanar l'operació al Taller Mecànic de l'ETSEIB, qui va trigar aproximadament 3 dies en retornar-les.

El muntatge i soldadura del circuit inductor secundari es va anar fent a mesura que s'anaven obtenint les espires (es va començar a soldar un cop ja es tenien totes les peces de curtcircuit).

La memòria es va anar elaborant al llarg de tot el projecte, i es va sotmetre en les dates sol·licitades per l'Escola.

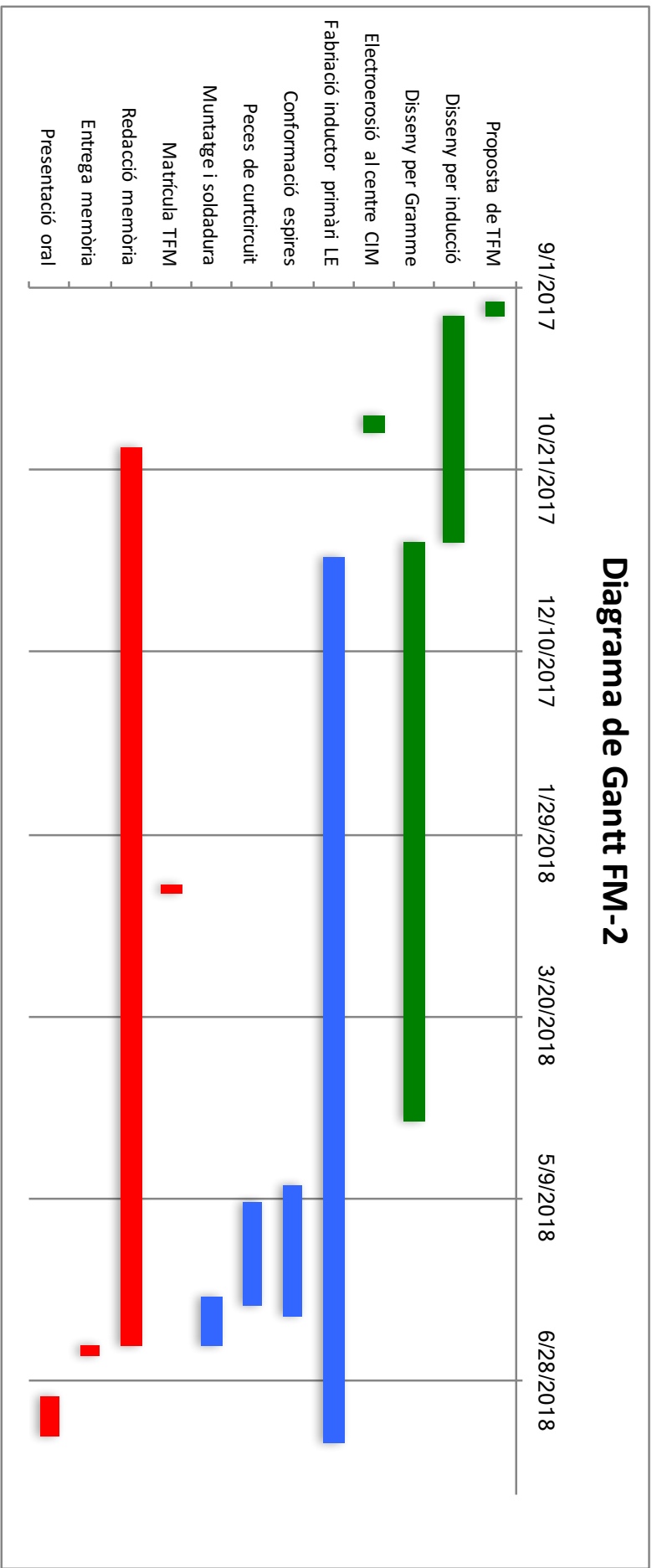


FIG. 6.1: ESQUEMA DE GANTT

7. Estudi econòmic

L'estudi econòmic realitzat s'ha basat en els costos que s'han hagut d'assumir per la realització del mateix. En alguns casos, no s'han hagut de costejar econòmicament (per exemple el cas del Taller Mecànic de l'ETSEIB), per tant s'ha fet una estimació, per si algú volgués repetir el procés. S'han deixat fora dels costos, els elements intangibles que ha proporcionat l'Escola, com lloc de treball, accés a bibliografia restringida o alguna llicència informàtica oberta als estudiants. Els costos queden resumits a la taula 7.1.

	Cost unitàri	Nombre d'unitats	Cost total
Rotor	250€/unitat	1 unitat	250 €
Planxa magnètica (estator)	300€/unitat	1 unitat	300 €
Electroerosió	50€/h	30h	1.500 €
Bobines de tub de coure recuit	25€/bobina	2 bobines	50 €
Passamà de coure	175€/unitat	2 passamans	350 €
Conformació de les peces de curtcircuit	-	36 unitats	700 €
Material soldadura	-	-	100 €
Hores de disseny i modificacions	20€/h	300h	6.000 €
Hores de fabricació (aprox.)	15€/h	150h	2.250 €
Hores d'elaboració de la memòria (aprox.)	10€/h	50h	500 €
Planxa magnètica inductor primari	350€/unitat	1 unitat	350 €
Bobinat inductor primari	-	-	1.600 €
Altres utilitatges	-	-	450 €
Instrumentació i varis de laboratori	-	-	200 €
Material d'oficina	-	-	50 €
Amortitzacions d'informàtica	-	-	250 €
Total aproximat	-	-	14.900 €

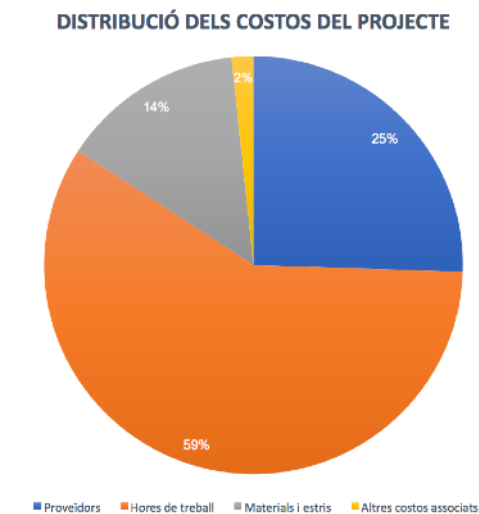
Els costos de rotor, planxa magnètica (estator), planxa magnètica (inductor primari), bobines de tub de coure i passamà de coure són costos per adquisició directa a proveïdors. Els costos d'electroerosió, bobinat de l'inductor primari i conformació de peces de curtcircuit fan referència als serveis obtinguts per proveïdors. La suma de tots ells són els costos associats als proveïdors variis.

En quant als costos associats a les hores de disseny i modificacions, fabricació i elaboració de memòria, són els que provenen de les hores dedicades per estudiant i director al llarg del projecte. La diferència entre els preus/hora associats a cada tasca s'han posat en funció del grau d'estudis necessàris, i la remuneració segons el mercat actual (de manera aproximada).

Un tercer grup de costos són aquells que provenen de materials i estris utilitzats per la fabricació de la FM-2, els quals inclouen elements bàsics per la màquina (rotor, planxes magnètiques, etc) o d'elements secundaris per la seva fabricació (material de soldadura, bobines de coure, material d'oficina, etc). També inclou la instrumentació necessària, com pot ser un soldador, cargol de banc, peu de rei... Ara bé, en aquest cas no s'ha considerat l'adquisició dels estris, sinó el cost aproximat per utilització (com si fos de lloguer).

Per últim, hi ha altres costos associats com pot ser l'amortització d'elements informàtics (com llicències, ordinador, connexió a internet), necessàries a l'hora de dissenyar i treballar.

El gràfic 7.1 permet discernir entre els costos comentats, ponderats respecte el total.



GRÀFIC 7.1: DISTRIBUCIÓ DE COSTOS

8. Impacte a l'entorn

La construcció del prototip ha implicat un nombre reduït de materials i residus generats. Durant la construcció, del poc residu generat, una bona part s'ha recollit per reciclar, com és la viruta de coure dels diferents talls o espires defectuoses, o les làmines sobrants en tallar la planxa magnètica de l'inductor secundari. Tots ells són perfectament reciclables, i tenen gran valor al mercat.

L'aplicació pensada per la màquina FM-2 és la d'ús com a motor d'una embarcació en l'àmbit naval. En aquesta aplicació la màquina proposada pot tenir un impacte molt positiu, en millorar l'eficiència dels propulsors elèctrics. Alhora també millora el manteniment, doncs permet eliminar la botzina encarregada de garantir l'estanqueïtat hidràulica.

La botzina és l'encarregada de separar l'aigua de mar del motor, però ha de permetre el gir de l'àrbre. Aquest element té un gran risc de trencament, i sempre genera calor per fricció, amb la qual cosa ha de tenir un cabal continu d'aigua. Aquest fet fa necessari que els motors de propulsió naval d'avui en dia hagin d'anar completament impregnats amb resina, per evitar el rovellament de totes les parts del motor, les quals són de material ferromagnètic (tant estator com rotor).

En el cas de la FM-2, en treballar amb rotor d'alumini, la seva resistència a la corrosió deguda a l'aigua és molt menor, i permetria estalviar la capa de resina sobre ell. La part tractors (rotor), pot anar directament en contacte amb l'aigua, permetent la unió de rotor i hèlix.

A més a més, hi ha un segon efecte positiu, i és la supressió dels greixos associats a la lubricació dels coixinets. En la FM-2, en no generar-se forces de reluctància sobre el rotor, el pròpi circuit hidràulic de la màquina està previst que descarregui el fluid refrigerant (aigua de mar filtrada) sobre el rotor, actuant com a coixinet hidrodinàmic. Apart de reduir l'ús de lubricants, també elimina els coixinets, elements crítics en el manteniment de la majoria de màquines. L'eliminació del coixinet és d'esperar que redueixi en gran mesura el soroll generat, millorant el confort per la gent d'abord.

Per últim caldria destacar que, si aquesta tecnologia prosperés, es podria analitzar la possibilitat d'introduir no un, sinó quatre propulsors distribuïts en l'embarcació, permetent una estabilització dinàmica (proposta exposada per Ramón Garrigosa [2017] a la seva tesi doctoral <http://hdl.handle.net/10803/459072>).

9. Conclusions

La FM-2 prové d'una llarga saga de màquines sense ferro al rotor, des de la primera proposada pel doctor Ricard Bosch, passant per la del doctor Victor Fuses i més endavant la de Francisco Moreno. Del que inicialment va començar com un conjunt de millores de la màquina FM-1, ha acabat sent el disseny i fabricació d'una nova tipologia de màquines que s'embarca en terreny inexplorat, del qual només a partir de la realització de proves experimentals se'n podrà garantir la validesa teòrica.

Al llarg d'aquest projecte s'han anat superant moltes dificultats que apareixien en cada pas que s'avançava. Tot i que la idea inicial era la de poder muntar i assajar la màquina FM-2, i hi havia il·lusió tant per part de l'estudiant com per part del director en què així fos, tant el retràs en l'obtenció de l'inductor primari, com en la gran dificultat de dissenyar i construir els utilatges pel muntatge i manipulació del conjunt, no ho van fer possible.

El protagonisme del projecte se l'ha endut el disseny i construcció de l'inductor secundari. En primer lloc per la innovació que suposa el disseny per màquina de Gramme amb dos inductors, sobretot pel fet de tenir aquest nou inductor secundari. I en segon lloc per l'alta complexitat que tenia tant dissenyar-lo, com construir-lo. Com a enginyer industrial especialitzat en mecànica, la conformació d'aquesta part de la màquina representava un repte de fabricació.

Probablement s'hauria pogut trobar un disseny que fós més senzill de fabricar i muntar, seguint l'anell de Gramme, però la filosofia de la FM-2 era la de seguir els passos de la seva antecessora, i mantenir mateixos estator i rotor. Cal tenir en compte que, un dels motius pels quals la màquina de Gramme es va deixar d'utilitzar en front a altres màquines elèctriques, era per la seva alta complexitat constructiva. I en ella només es disposava d'un estator, contra els dos de la FM-2.

Queda doncs pendent, per a futurs projectes i línies d'investigació, dos possibles vies per treballar. En primer lloc la de dissenyar i conformar els utilatges de muntatge i manipulació del conjunt de la FM-2, i en segon lloc la de buscar noves geometries per portar la idea del número de pols variables i totalment controlables, a sistemes de menor complexitat constructiva.

10. Agraïments

Es vol agraïr la col·laboració a tota aquella gent que ha estat relacionada amb el projecte d'alguna manera, i a familiars i amics pel suport al llarg de tantes hores.

Concretament, es vol donar les gràcies a Francisco Moreno pel seu gran treball amb la FM-1, i sobretot a Victor Fuses, qui a més d'il·lustrar amb la VF-1, ha ajudat i aportat idees i solucions constructives per la FM-2.

L'agraïment més especial és pel director del projecte, Ricard Bosch, qui no només hi ha posat una dedicació exquisita en l'elaboració del projecte, amb aportacions d'idees brillants. Sinó que a més a més, ha ensenyat molts bons trucs, tant de fabricació com de *savoir faire* al laboratori. Es podria dir que al llarg d'aquest projecte s'han après un gran nombre de conceptes pràctics complementaris als teòrics que s'aprenen entre el grau i el màster d'enginyeria industrial. Sens dubte, aquest treball no s'hauria pogut dur a terme sense el doctor Ricard Bosch.

11. Bibliografia

11.1. Referències bibliogràfiques

- [1] Garrigosa G, Ramón: **Anàlisi experimental de la problemàtica de càrrega-descàrrega de ACEE aplicables en transports**. Barcelona: UPC, tesi doctoral. Director: Ricard Bosch, 2017.
- [2] Fuses N, Victor: **Noves aplicacions de la trompa d'aigua o trompa dels pirineus: elevació d'aigua, aire comprimit i generació d'electricitat**. Barcelona: UPC, tesi doctoral. Director: Ricard Bosch, 2010.
- [3] Moreno V, Francisco: **Disseny i anàlisi de la viabilitat constructiva de la màquina elèctrica FM-1**. Barcelona: UPC, projecte final de màster. Director: Ricard Bosch, 2015.

11.2. Altres referències bibliogràfiques

- [4] Bosch T, Ricard: **Los orígenes de una dinamo de Gramme en la ETSEIB**. *Quaderns d'història de l'enginyeria, volum V*. Barcelona 2003.
- [5] Bosch T, Ricard: **Desenvolupament del motor elèctric sense coixinets**. Barcelona: UPC, tesi doctoral. Director: Alfons Ensenyat, 1987.
- [6] Chapman, Stephen: **Máquinas eléctricas (3a edición)**. Mc Grau Hill ISBN 958-4100-56-4.
- [7] Llibre d'apunts de l'assignatura Sistemes de Fabricació, ETSEIB, Barcelona. Temes: 5, 6 i 9. Última consulta: 18/4/2018.
- [8] Pyrhönnen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: **Design of rotating electrical machines**. John Wiley & Sons Ltd. 2009.
- [9] Rodríguez P, Miguel Angel: **Máquinas de corriente continua**. Cantabria: Departamento de ingeniería eléctrica y energética de la Universidad de Cantabria, 2017.
- [10] Tuhoy, Paul: **Development of Canned Line-star Rim-driven Electric Machines**. Manchester: University of Manchester, tesi doctoral, 2018.

